

黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水土流失效应

朱锐鹏^{1,2}, 刘殿君³, 张世豪^{1,2}, 高志强⁴, 左启林^{1,2}, 赵炯昌^{1,2}, 王百群⁵, 于洋^{1,2}

(1.北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100083; 3.内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010051; 4.准格尔旗水务局, 内蒙古 准格尔旗 017100; 5.中国科学院 水利部 水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探究黄土丘陵沟壑小流域不同类型植被措施的水土保持效益,以地处黄河中游内蒙古段的圪坨店小流域为研究区,建立 6 个投影面积为 5 m×20 m 的径流监测小区,基于野外径流小区定位监测和降雨监测数据,分析不同年份降水特征和坡面不同土地利用类型(油松、沙棘、人工草地、天然草地、农田)对产流产沙的影响,并设置裸地径流小区作为对照,采用不同土地利用类型径流系数和单位面积侵蚀量与裸地的比值表征减流减沙效益。结果表明:研究时段(2014—2017 年)内,降水集中分布在 6—9 月。不同土地利用类型的径流量和泥沙量差异显著($p<0.05$),径流量最小的是油松林地,为 (4.55 ± 3.25) L;径流量最大的是裸地,为 (412.73 ± 97.09) L。不同土地利用类型径流量具体表现为:裸地>农田(玉米)>天然草地(针茅)>人工草地(苜蓿)>沙棘>油松林。泥沙量观测结果与径流量类似,最小的是油松林,为 (0.8 ± 0.38) g/L;最大的是裸地,为 (87.36 ± 15.37) g/L。不同土地利用类型径流系数和侵蚀模数差异显著($p<0.05$),其中,农田径流系数最高,为 $12.26\%\pm1.27\%$,油松林径流系数最低,为 $0.09\%\pm0.06\%$,不同土地利用类型径流系数具体表现为:农田>天然草地>人工草地>沙棘>油松林地。同样的,油松侵蚀模数最低,是 (0.002 ± 0.001) kg/(m²·a),农田侵蚀模数最高,为 (1.49 ± 0.71) kg/(m²·a)。观测时段内,不同土地利用类型侵蚀模数与径流系数表现一致。综上所述,植被恢复能有效控制水土流失,不同植被措施的减流减沙效益有显著差异,具体表现为:油松>沙棘>人工草地>天然草地>农田。研究结果可为黄河中游内蒙古段植被恢复流域综合治理提供依据。

关键词:坡面径流;黄土高原;植被类型;减流效益;减沙效益

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0010-08

Characteristics of Runoff and Sediment Yield in Different Land Use Types in Hilly and Gully Region of the Loess Plateau

ZHU Ruipeng^{1,2}, LIU Dianjun³, ZHANG Shihao^{1,2}, GAO Zhiqiang⁴,
ZUO Qilin^{1,2}, ZHAO Jiongchang^{1,2}, WANG Baiqun⁵, YU Yang^{1,2}

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083,

China; 2.Jixian National Forest Ecosystem Research Network Station, CNERN, Beijing Forestry

University, Beijing 100083, China; 3.Water Conservancy Research Institute Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010051, China; 4.Water Resources Bureau of Jungar Banner, Jungar Banner, Inner Mongolia 017100,

China; 5.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to study the different soil and water conservation benefits of different land use types in the Loess hilly watershed, Getuodian watershed which is located in the Inner Mongolia section of the middle reaches of the Yellow River was used as study site. Soil erosion characteristics of six land use types, including forestland (*pinus tabuliformis*), sea-buckthorn (*Hippophae rhamnoides*), artificial grassland (*Medicago arabica*), natural grassland (*Stipa capillata*) and farmland (*Zea mays*) were analyzed based on long term in-situ field monitoring. Meanwhile, the bare land was used as control, the runoff coefficient and the ratio of erosion modulus to bare land were calculated as the benefits of runoff and sediment reduction of different land use types. Based on the long-term monitoring data, the results showed that the precipitation during the study

收稿日期:2021-11-10

修回日期:2021-12-23

资助项目:国家自然科学基金(42177310);内蒙古自治区水利科技重大专项(213-03-10-303002-NSK2017-M2)

第一作者:朱锐鹏(1998—),男,新疆乌鲁木齐人,硕士研究生,主要从事植被恢复的生态效应研究。E-mail:zrp13325573156@163.com

通信作者:于洋(1985—),男,河北承德人,博士,副教授,主要从事植被恢复与流域治理研究。E-mail:theodoreyy@gmail.com

period (2014—2017) concentrated from June to September; runoff volume and sediment amount exhibited significant differences among different land use types ($p < 0.05$); forestland had the lowest runoff volume $[(4.55 \pm 3.25) \text{ L}]$ whereas bare land had the highest $[(412.73 \pm 97.09) \text{ L}]$; the results of sediment amount are consistent with runoff, bare land generated the highest sediment amount with $(87.36 \pm 15.37) \text{ g/L}$, and forestland yielded the lowest sediment amount with $(0.8 \pm 0.38) \text{ g/L}$; the runoff coefficient and erosion modulus of different land use types showed significantly different; the highest and lowest runoff coefficients were observed in farmland and forest forestland, which were $12.26\% \pm 1.27\%$ and $0.09\% \pm 0.06\%$, respectively; the runoff coefficients of different land use types decreased in the order: farmland > natural grassland > artificial grassland > sea-buckthorn > forestland; similarly, the erosion modulus of forestland showed the lowest $[(0.002 \pm 0.001) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$ whereas farmland had the highest $[(1.49 \pm 0.71) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})]$; the erosion modulus was consistent with the runoff coefficient. These results show that vegetation restoration can prevent soil erosion and the different land use types have different soil and water conservation benefits. The benefits of different land use types increased in the order: natural grassland < artificial grassland < sea-buckthorn < forestland. These results can provide the basis for the vegetation restoration and comprehensive watershed management in the Inner Mongolia section of the middle reaches of the Yellow River.

Keywords: soil and water conservation; slope runoff; Loess Plateau; vegetation restoration; runoff reduction benefit; sediment reduction benefit

土壤侵蚀是土地退化的主要形式,人为造成的水土流失已成为制约区域可持续发展的重要生态环境问题,黄土高原是世界上土壤水蚀最为严重的地区之一。伴随退耕还林工程的实施,大规模的生态建设有效防治了黄土高原的水土流失^[1]。在新时期黄河流域高质量发展的国家战略下,黄河流域仍然存在空间治理不均、局部地区水土流失严重等问题^[2]。在当前形势下,如何优化流域景观格局配置,从而充分发挥不同植被类型的水土保持效益,是实现区域水土保持可持续发展的关键问题之一。

长期以来,植被恢复被认为是针对脆弱生态系统防治水土流失、改善恶劣生态环境的有效策略。研究表明,退耕还林工程的实施使黄土高原地区植被盖度显著增加,这有效改善了该地区土壤水分条件,并显著增加了土壤入渗^[3-4],大幅减少了土壤侵蚀^[5]。王升等^[6]在黄土高原地区研究不同植被覆盖度下坡面产流产沙规律时发现,随植被覆盖度的增加,产流量和产沙量均显著减少。吴蕾等^[7]研究发现,当植被盖度维持在70%~80%时,植被的蓄水保土作用最明显。Vasquez-Mendez等^[8]研究发现不同的植被类型有不同的形态和结构,灌木在减少径流和泥沙量方面效果最显著,其次是草本植物和乔木。Mongil-Manso等^[9]研究结果表明乔木能通过提高植被覆盖率、增加土壤有机质等方式,增大土壤孔隙度和入渗率、降低土壤容重^[10],减少坡面产流产沙,其中油松林增加入渗的效果最好,是灌木林的3倍。肖培青等^[11]研究结果表明灌木枝叶能显著增加对雨滴的截留作用并

增加坡面粗糙度,相同土壤和降雨条件下,裸地平均土壤流失率为44.19~114.61 g/(min·m²),灌木地为5.61~84.58 g/(min·m²)。

砒砂岩区主要分布在黄河中游的鄂尔多斯高原,总面积约1.67万km²,按覆土程度可大致分为裸露区、覆土区、覆沙区。作为黄河粗泥沙的主要源区^[12],该区基岩裸露、植被稀疏、沟壑纵横、生态环境异常脆弱,常年水蚀、风蚀、冻融侵蚀交错发生,其中多动力交互作用的叠加放大效应使产沙量显著增加^[13]。陡峭坡面是该地区的主要泥沙来源,约占产沙量的87.4%^[14]。研究表明,砒砂岩能显著降低土壤入渗速率和饱和导水率^[15],进而加剧水土流失^[16]。姚文艺等^[17]提出可以通过砒砂岩改性材料与植物措施相结合等方式防治水土流失和修复砒砂岩地区生态。人们虽然对砒砂岩的危害及其开发治理等^[18]方面开展了研究,但是围绕该地区坡面尺度不同土地类型的减流减沙效益相关报道较少。本文以地处黄河中游内蒙古段的圪坨店小流域为研究对象,基于流域内不同类型(裸地、农田、天然草地、人工草地、沙棘、油松)坡面径流小区2014—2017年径流泥沙监测结果,分析不同土地利用类型产流产沙特征,并与裸地小区进行对比,分析不同植被类型水土保持效益。研究结果为进一步了解不同植被类型产流产沙规律,以及该地区流域综合治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

圪坨店沟小流域位于黄河流域一级支流塔哈拉

川上游,地理坐标(111°12′00″—111°14′40″E,40°18′40″—40°23′00″N)。流域总面积 7 km²,圪坨店小流域属鄂尔多斯黄土高原丘陵沟壑区,梁峁顶覆盖栗质土较薄,部分梁峁坡及沟道两岸基岩裸露,岩性软弱遇水极易崩解。流域主沟道沟床呈“U”型、支毛沟呈“V”字型。流域呈西北—东南走向,最高点海拔 1 325.2 m,最低点海拔 1 167.5 m,相对高差 157.7 m,主沟道长 4 253 m,宽 2 120 m,沟壑密度 4.5 km/km²。流域属典型的大陆性季风气候。主要特点是冬季寒冷漫长,夏季炎热短暂,春季多风沙,以西北风为主,降雨少而变频大,常有春旱出现,雨水多集中在 7—9 月三个月,占全年总降水量的 60%~80%。据沙圪堵气象站统计资料:准格尔旗多年平均降水量 386.4 mm,实测年最大降水量达 636.5 mm(1967 年),年最小降水量 100.8 mm(1962 年),多年平均蒸发量 2 234.4 mm,干燥指数 $d \geq 5$,年平均日照时数在 3 000 h,全年平均风速 2.2 m/s。大风主要集中在 4—5 月和 10—11 月。年平均扬沙日数 32.8 d,年均沙尘暴日数 15.2 d,年平均气温 7.3℃,极端最高气温 38.3℃(1999 年 7 月 28 日),最低气温 -30.9℃(1971 年 1 月 2 日),无霜期 153 d,封冻期为 11 月至次年 3 月底,最大冻土深度 1.5 m。主要植被乔木林有杨树、柳树、油松;灌木主要包括针茅、沙棘、蒿类、柠条;经济林有山杏、海红果;人工草地分布有苜蓿、草木樨、沙打旺;野生植物有沙蒿、沙竹、棉沙蓬、胡枝子等。

1.2 研究方法

1.2.1 径流小区布设 根据当地地形、气候和植被条件,选择农田、天然草地、人工草地、沙棘和油松 5 种不同的植被类型,采用随机区组设计修建投影面积为 5 m×20 m 的标准径流小区,观测地表径流和土壤侵蚀量,并设裸地小区作为对照。径流小区由边埂、保护带、分流桶、集流桶、排水系统组成,并设置分流级别为 1,分流孔数目为 9,分流孔高度 0.6 m,分流桶横截面积 0.502 4 m²的监测设备,以便收集径流深、含沙量、降雨量、降雨历时、时段降雨、最大 30 min 雨强等小区产流产沙数据。各小区特征信息见表 1。

表 1 径流小区概况

小区类型	小区内植被类型	植被状况
裸地		
农田	马铃薯、玉米	每个小区种植 150 株
天然草地	棉沙蓬、针茅、牛筋草、苍头	高度 0.5 m
人工草地	苜蓿、草苜蓿	高度 0.6 m
灌木林地	沙棘	高度 1.4 m,冠直径 1.5 m
乔木林地	油松林	植被高度 1.9 m,冠直径 1.9 m,胸径 0.08 m,每个小区栽植 18 株

1.2.2 径流泥沙定位监测 次降雨事件后直接测量分流桶内水深,通过桶底面积估算径流量,公式为:

$$Q = h s \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中:Q 为径流量(L);h 为水深(m);s 为分流桶底面积(m²)。

次降雨产流结束后,充分搅拌分流桶内收集的径流,采用 1 000 ml 的取样瓶收集浑水样,每个小区分别采集 3 个样品,经沉淀、过滤、烘干和称重,可得分流桶泥沙量,加上集沙槽的泥沙量即为次降水产沙量。

采用径流系数和侵蚀模数可以更合理地表征坡面产流产沙特征。径流系数是指一个时段里的径流深度和相应降水深度的比值,因此径流系数是一个无量纲数。用公式表示为

$$\alpha = \frac{R}{P} \times 100\% \tag{2}$$

式中:α 表示径流系数;R 表示径流深度(mm);P 表示降雨深度(mm)。

侵蚀模数表示在单位时间内,单位面积发生的土壤侵蚀量,用公式表示为

$$k = \frac{G}{S} \tag{3}$$

式中:k 表示侵蚀模数[kg/(m²·a)];G 表示小区年产沙总量(kg);S 表示小区投影面积(m²)。

将减流减沙效益定义为同一次降雨过程中,不同植被类型的径流系数以及侵蚀模数与裸地的比值,以便更直观地比较不同土地利用类型的减流减沙效益,用公式表示为:

$$CR_y = \frac{\alpha}{\alpha_{ck}} \times 100\% \tag{4}$$

$$CS_v = \frac{k}{k_{ck}} \times 100\% \tag{5}$$

式中:CR_y,CS_v分别表示不同土地利用类型的减流减沙效应;α 表示小区径流系数;k 表示小区单位面积侵蚀量;ck 表示裸地小区。

1.2.3 数据处理与分析 采用 R4.1.1 软件进行数据处理与分析,相关数据采用平均值±标准误(Mean±SD)来表示,采用方差分析比较不同土地利用类型之间径流量、泥沙量、径流系数和侵蚀模数的差异,应用最小显著差数法进行多重比较(显著性水平 $p = 0.05$)。采用 Origin Pro 2021 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 降水特征

2014—2017 年,逐年降水总量分别为 442 mm,373 mm,604.7 mm,379 mm。监测时段内,侵蚀性

降水合计 22 次,共占降雨总次数的 8.46%(图 1)。其中在生长季 5—10 月内的降水量分别为 294.5 mm,227 mm,472 mm,201.5 mm,占降雨总量的 66.6%,60.1%,78.1%,53.2%。5—8 月降水量逐月增加,8 月降水量最大,分别为 107 mm,51 mm,183 mm,84.2 mm,约占全年降水量的 24%,13.6%,30%,22%,仅 2015 年最多降水量发生于 6 月,共降水 96.5 mm,约占全年降水量 25.8%。降雨侵蚀与最

大 30 min 雨强关系密切,在观测期间,生长季内共降水 59 次,其中 I_{30} 大于 15 mm/h 的降水有 21 次,约占生长季降水的 35.6%,其中 18 次为侵蚀性降水。4 a 的降雨侵蚀力分别为 744.2,979.5,1 892.5,318.5 $\text{MJ} \cdot \text{mm}/(\text{hm}^2 \cdot \text{h})$ 。最大降雨侵蚀力的降水分别发生在 8 月 1 日,6 月 15 日,8 月 17 日,8 月 18 日。该地区降水主要特点是年降雨总量少,降雨强度大,年内分布集中,年际变化大。

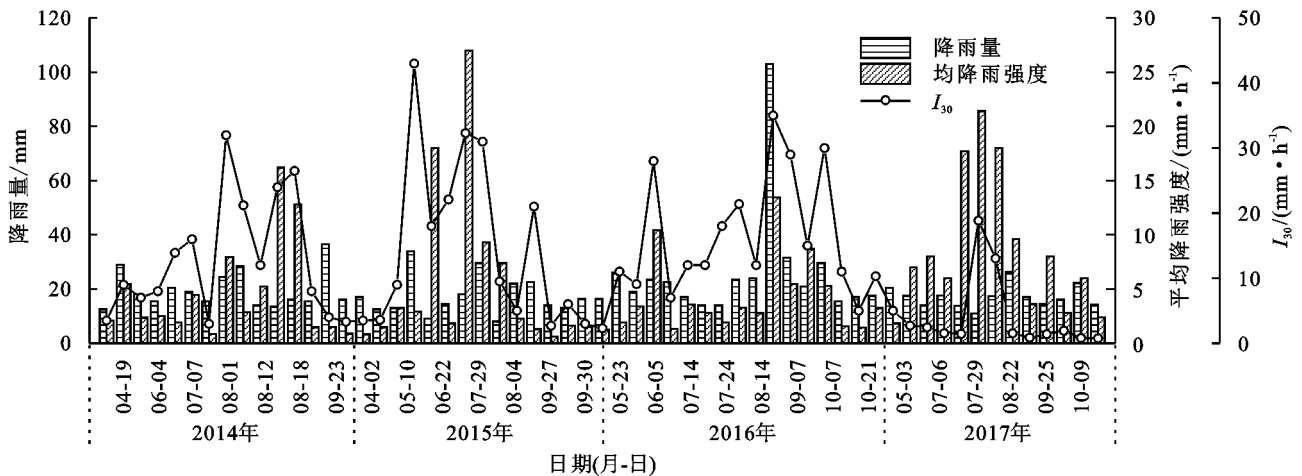


图 1 2014—2017 年降雨特征

2.2 不同土地利用类型的径流量和泥沙量

对不同土地利用类型小区径流量观测结果进行单因素方差分析,结果见图 2A,不同土地利用类型坡面径流量有显著差异($p < 0.05$)。裸地和农田之间径流量差异不显著,但显著高于其他类型。油松、沙棘、人工草地、天然草地之间径流量差异不显著。6 种土地利用类型观测小区年均径流量分别是裸地(412.73 ± 97.09) L,农田(323.18 ± 66.87) L,天然草地(101.52 ± 24.10) L,人工草地(54.55 ± 18.87) L,沙棘(25.76 ± 12.11) L,油松林(4.55 ± 3.25) L。

小区的径流中泥沙含量观测结果见图 2B,由图可知,各个土地利用类型径流含沙量差异显著($p < 0.05$)。裸地和农田之间坡面径流含沙量无显著差异($p > 0.05$),但两者显著高于其他类型。油松、沙棘、人工草地、天然草地径流含沙量差异不显著($p > 0.05$)。6 种土地利用类型中,径流泥沙含量最高的是裸地,为(87.36 ± 15.37) g/L,最低的是油松林,为(0.8 ± 0.38) g/L,其他各土地利用类型含沙量为农田(59.11 ± 15.72) g/L,天然草地(4.12 ± 1.18) g/L,人工草地(1.38 ± 0.63) g/L,沙棘(1.3 ± 0.64) g/L。

与径流量分析结果类似,不同土地利用类型径流

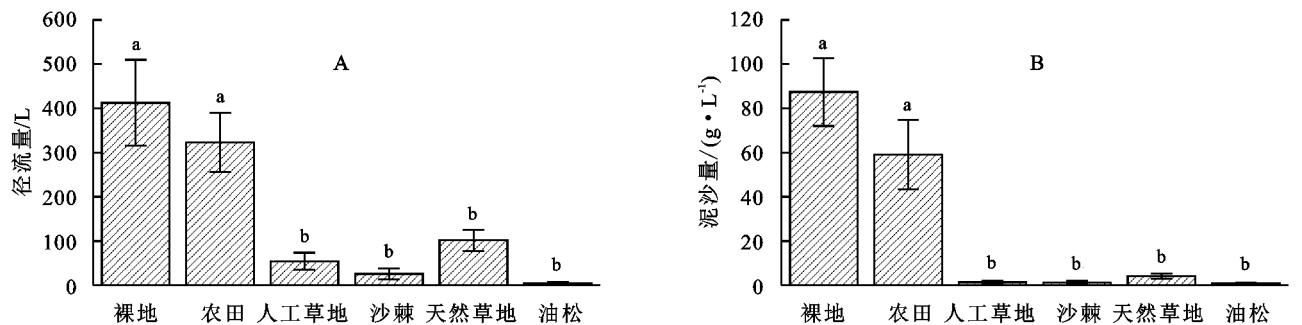


图 2 不同土地利用类型径流量和泥沙量

2.3 不同年份间各土地利用类型产流产沙特征

对不同年份间各土地利用类型径流系数进行双因素方差分析(图 3),不同土地利用类型在不同观测年份径流系数差异显著($p < 0.05$)。降雨强度最大的

2015 年径流系数显著高于其他年份,侵蚀性降雨次数最少的 2017 年径流系数最低。在不同土地利用类型中,裸地小区径流系数显著高于农田小区,并且农田显著高于其他植被类型。天然草地、人工草

地、沙棘小区之间径流系数差异不显著,油松小区显著高于天然草地。在侵蚀性降雨较少的时期内,天然草地、人工草地、沙棘和油松不产生坡面径流。监测期间,除 2014 年农田小区径流系数大于裸地外,各植被类型小区的径流系数大小均为:裸地>农田>天然草地>人工草地>沙棘>油松。具体为裸地小区 $16.36\% \pm 1.28\%$ 、农田小区 $12.26\% \pm 1.27\%$ 、天然草地 $4.5\% \pm 0.79\%$ 、人工草地 $2.33\% \pm 0.63\%$ 、沙棘 $1.24\% \pm 0.43\%$ 和油松林地 $0.09\% \pm 0.06\%$ 。

不同年份间各土地利用类型侵蚀模数进行双因素方差分析,结果见图 3,不同土地利用类型在不同观测年份的侵蚀模数差异显著($p < 0.05$)。降雨量最大的 2016 年侵蚀模数显著高于其他年份。在相同降水条件下,只有 2016 年农田侵蚀模数显著低于裸地,其他观测年份中,裸地和农田小区侵蚀模数差异不显著,但是显著高于其他土地利用类型的观测小区。监测期内,6 种土地利用类型观测小区的年均土壤侵蚀模数分别是裸地 $(3.38 \pm 1.77) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,农田 $(1.49 \pm 0.71) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,天然草地 $(0.056 \pm 0.032) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,人工草地 $(0.01 \pm 0.006) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,沙棘 $(0.009 \pm 0.004) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,油松林 $(0.002 \pm 0.001) \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。

2.4 不同土地利用类型的减流减沙效益

以裸地为对照,将各个小区的产流产沙数据与裸地小区进行对比,分析不同植被类型的减流减沙效益差异。各植被类型减流效益见图 4A,减流效益最好的是油松林,为 $0.43\% \pm 0.29\%$;最差的是农田,为 $73.37\% \pm 8.64\%$ 。其他类型减流效益依次为,沙棘 $5.64\% \pm 3.15\%$,人工草地 $13.52\% \pm 5.27\%$,天然草地 $21.47\% \pm 4.97\%$ 。

各植被类型减沙效益见图 4B,与减流效益类似,油松林减沙效益最好,是农田的 3 倍。5 种植被类型的减沙效益分别是油松林 $0.03\% \pm 0.02\%$,沙棘 $0.36\% \pm 0.22\%$,人工草地 $0.81\% \pm 0.4\%$,天然草地 $9.01\% \pm 4.16\%$,农田 $56.47\% \pm 12.58\%$ 。

3 讨论

研究表明,降雨状况和土地利用类型对坡面产流产沙均有显著影响^[19]。圪坨店小流域侵蚀性降水的年内分布不匀,连续四年的监测结果显示,研究区内降水季节性分布明显,多集中在 6—9 月,分别占全年降水总量的 76.1%,75.2%,76.4%,65.5%。侵蚀性降水与降雨侵蚀力有很强的相关性^[20]。侵蚀性降水

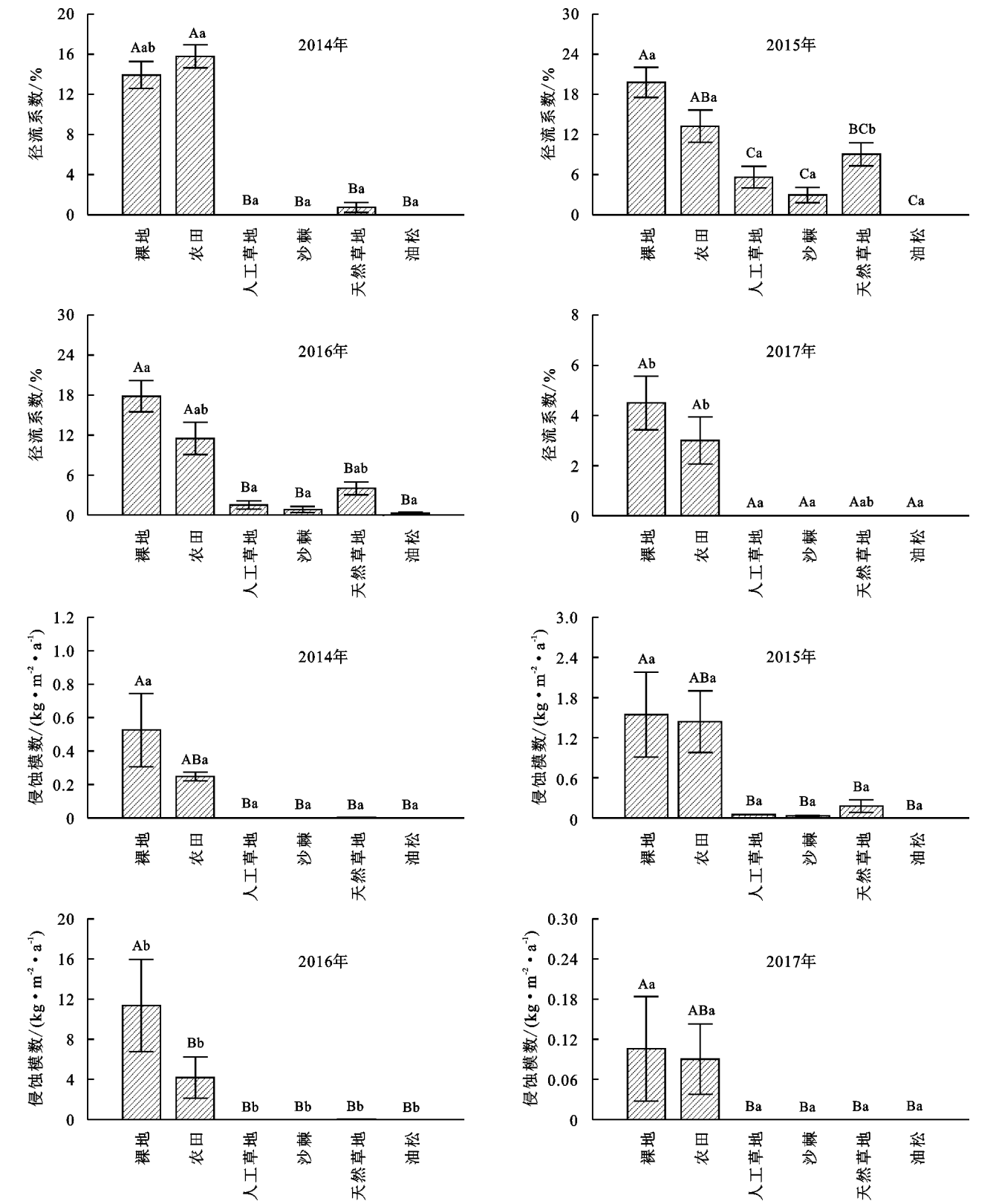
与降水量年内分布大致相同,四年内 22 次侵蚀性降水均分布在 6—9 月,占生长季降水的 37.3% 和全年降雨次数的 8.46%。黄土高原地区侵蚀性降雨发生频次和次降雨量不大,但是变异性很大,严重的土壤侵蚀主要是由少数几场强降雨造成的。年际变化幅度大,对坡面产流产沙有显著影响。观测结果表明,4 年中,2016 年降水量最多,达 604 mm,导致 2016 年侵蚀模数和径流系数都显著高于其他年份。有学者提出近 50 年来,黄土高原年降水量明显减少,降雨强度却没有显著下降^[21]。2015 年和 2017 年降雨总量差别不大,分别有 373 mm 和 379 mm,但是侵蚀性降雨次数、降雨侵蚀力差异显著,分别有侵蚀性降水 8 次和 2 次。主要原因是 2015 年内的降水历时短,降雨强度大,导致降雨侵蚀性强,侵蚀性降雨次数增多,而 2017 年降水强度小,不容易形成坡面积水,因此 2017 年径流系数显著低于其他年份。从次降水事件来看,降雨侵蚀性大小与最大 30 min 雨强呈极显著相关关系^[22],在 I_{30} 大于 15 mm/h 的降水中,有 85.7% 为侵蚀性降水。 I_{30} 大于 30 mm/h 的降水全部为侵蚀性降水。在单次降水过程中,随着降水持续,降雨强度有迅速增大而后缓慢减小的趋势,最大 30 min 雨强通常出现在降雨过程的前半段。

研究表明,在植被生长早期,降雨是影响水土流失量的主要因素;经过几年的生长,降雨对土壤侵蚀的影响逐渐降低,主要由植被类型和土地利用方式等因素影响坡面径流和土壤流失量^[23]。观测结果表明,对于不同的年降雨状况,降雨侵蚀力较低时,防护效益更显著,随着年降雨量和降雨侵蚀力增大,各植被类型的减流减沙效益减弱。降雨侵蚀力最低的 2017 年,天然草地、人工草地、沙棘以及油松林小区年径流系数和侵蚀模数均为 0。

各类土地利用类型之间减流减沙效益差异显著,各类型减流减沙效益顺序为油松林地>沙棘地>人工草地>天然草地>农田。油松和沙棘林冠幅大,能更好地重新分配降水,削弱雨滴动能,植物根系能固持土壤,增强土壤抗冲性,改良土壤理化性质,大幅度减少了坡面产流。油松林有较高的郁闭度,林冠层能改变降雨特性,当降雨强度大于 0.1 mm/min 时,林冠使雨滴动能显著下降^[24]。油松林下主要由枯枝落叶覆盖、林下植被覆盖和少量裸露地块组成,枯枝落叶层和林下植被发育良好,具有良好的减流减沙效益。林下灌草植被和枯落物能再次削弱雨滴动能,增大坡面粗糙度,改良土壤理化性质,提高土壤蓄水能力,其中当枯落物覆盖度达到 100% 时,减流减沙效益最大为 80% 和 98%^[25]。3 种地块的结合能显著减

少坡面产流产沙。研究结果表明乔木林能显著减少黄土高原地区年平均径流量^[26]。灌木林有显著延长径流产生的时间和减慢径流流速的作用^[27]。沙棘由于树冠贴近地表,能拦截降水,保护土壤,同时林下枯

落物阻碍了坡面径流,延长了汇流时间^[17],使水分有充足时间入渗,因此沙棘减流减沙效益显著。沙棘还通常被用于构建柔性坝并与工程措施相结合等方式改造砒砂岩,防治砒砂岩地区水土流失^[28-29]。



注:大写字母表示不同土地利用类型显著差异,小写字母表示不同观测年份显著差异。

图3 各监测年不同土地利用类型的径流系数和侵蚀模数

草地也表现出较好的减流减沙效益,主要通过地上部分和地下部分共同作用减少坡面产流产沙,其中地上植被通过改变坡面水力系数、增加地表粗糙度等方式,减缓径流流速,促进水分入渗,消耗径流动能。地下根系部分的作用主要体现在改善土壤结构、增大土壤孔隙度,提高土壤抗冲性能和入渗能力等方面。张琪琳等^[30]研究发现地下部分的减流减沙效应甚至比地上部分更显著。天然草地的草种主要有棉沙蓬、针茅、牛筋草、苍头等,这些草种虽抗旱能力强,但是对水分条件非常敏感,地上植被生长状况主要取决于生长季内降雨量,并且根系发达,有很强的吸收土壤水分和养分的能力。人工草地的主要草种是人为选择的苜蓿和草苜蓿。苜蓿

地下根系密,能更好地固持土壤,增大土壤孔隙度,改善土壤结构,增加径流入渗,并且耐干旱、产量高,常被用于生态修复和水土保持^[31]。因此,受不同草种生长过程和改良土壤程度不同的影响,人工草地的减流减沙效益更优于天然草地。相关报道表明,不同类型灌草格局对坡面侵蚀产沙有显著影响,张恒星等^[32]认为地块破碎程度较高的块状镶嵌格局储水减沙效益最好。张霞等^[33]研究发现坡面植被分布在坡面中下部为植被最佳的植被空间配置方式。本研究仅以植被类型为研究对象,未来还需讨论植被格局对产流产沙过程的影响,并且重点关注不同的植被特征、土壤属性等因素造成不同土地利用类型产流产沙的机理差异。

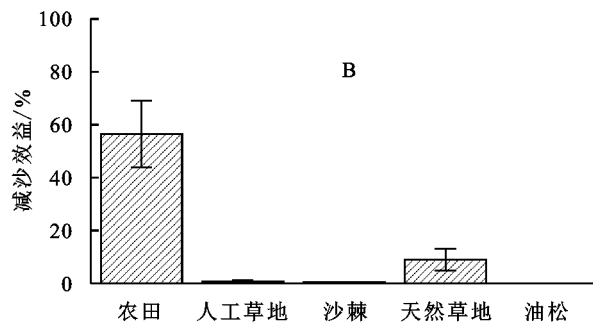
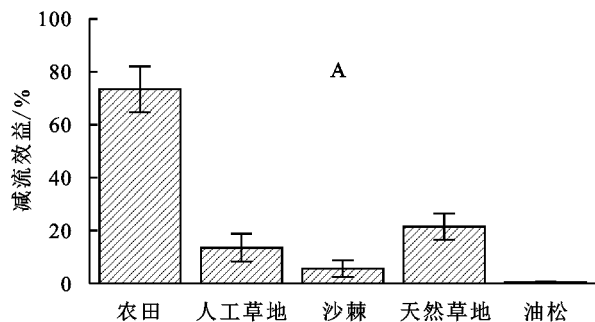


图4 不同土地利用方式的减流减沙效益

4 结论

(1) 研究区降雨量年际变化大,年内分配不匀,主要集中在生长季6—9月内,其中6—8月降雨量逐渐增加,8—9月逐渐减少。侵蚀性降水的年内分布与降水总量大概一致,四年侵蚀性降水共22次,占总次数的8.46%。侵蚀性降水与 I_{30} 关系密切, I_{30} 大于15 mm/h的降水有21次,其中18次为侵蚀性降水;

(2) 不同土地利用类型的坡面径流量差异显著。裸地和农田之间没有显著差别,但是显著高于其他类型。各类利用类型的径流量依次为裸地>农田>天然草地>人工草地>沙棘>油松林地。不同土地利用类型的径流泥沙含量与径流量类似。裸地和农田显著大于其他类型。天然草地、人工草地、沙棘和油松林地之间含沙量差异不显著;

(3) 不同年份的降雨状况和不同土地利用类型对径流系数和侵蚀模数均有显著影响。各年份径流系数排序为2015年>2016年>2014年>2017年。裸地和农田坡面的径流系数显著高于其他类型。天然草地径流系数显著高于油松林地。各类利用类型的径流系数依次为裸地>农田>天然草地>人工草地>沙棘>油松林地;不同年份侵蚀模数排序为2016年>2015年>2014年>2017年。不同土地利

用类型的侵蚀模数表现类似。裸地显著大于农田,农田显著大于其他类型。天然草地、人工草地、沙棘和油松林地之间侵蚀模数有差异但不显著;

(4) 各种植被类型之间减流减沙效益差异显著,油松的减流减沙效益最好,分别是0.43%,0.04%。农田的效益最差,仅为73.37%,53.32%。具体顺序为:油松>沙棘>人工草地>天然草地>农田。

参考文献:

- [1] Feng X, Wang Y, Chen L, et al. Modeling soil erosion and its response to land-use change in hilly catchments of the Chinese Loess Plateau [J]. *Geomorphology*, 2010, 118(3/4):239-248.
- [2] Wang S Y. Temporal change in the landscape erosion pattern in the Yellow River Basin, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2007, 21(10):1077-1092.
- [3] Hany E K, Zhang H F, Zhang P C, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China [J]. *Catena*, 2013, 105:1-10.
- [4] Tang B Z, Jiao J Y, Yan F C, et al. Variations in soil infiltration capacity after vegetation restoration in the hilly and gully regions of the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 19(3):1456-1466.

- [5] Wang S, Fu B, Piao S, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [6] 王升,王全九,董文财,等.黄土坡面不同植被覆盖度下产流产沙与养分流失规律[J].*水土保持学报*,2012,26(4):23-27.
- [7] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产流产沙的影响[J].*水土保持研究*,2019,26(6):133-138,144.
- [8] Rebeca V M, Eusebio V R, Klaudiaet O, et al. Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico [J]. *Catena*, 2010,80(3):162-169.
- [9] Mongil-Manso J, Navarro-Hevia J, San Martín R. Does forest restoration influence soil infiltrability? A case study in the restored woodland of Sierra de Ávila (Central Spain) [J]. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(7):1778-1793.
- [10] 李海防,卫伟,陈利顶,等.黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展[J].*水土保持研究*,2013,20(1):287-293.
- [11] Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Effects of shrub on runoff and soil loss at loess slopes under simulated rainfall [J]. *Chinese Geographical Science*, 2017, 27(4):589-599.
- [12] 申震洲,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区地貌-植被-侵蚀耦合研究进展[J].*水利水电工程学报*,2020(4):64-71.
- [13] 张攀,姚文艺,肖培青,等.黄河流域砒砂岩区多动力侵蚀交互叠加效应研究[J].*水利学报*,2022,53(1):109-116.
- [14] Xie F, Zhao G, Mu X, et al. Sediment Yield in Dam-Controlled Watersheds in the Pisha Sandstone Region on the Northern Loess Plateau, China[J]. *Land*, 2021, 10(11):1264.
- [15] Ma W M, Zhang X C. Effect of Pisha sandstone on water infiltration of different soils on the Chinese Loess Plateau [J]. *Journal of Arid Land*, 2016,8(3):331-340.
- [16] Zhou J, Fu B J, Yan D C, et al. Assessing the integrity of soil erosion in different patch covers in semi-arid environment [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,571:71-86.
- [17] 姚文艺,吴智仁,刘慧,等.黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J].*人民黄河*,2015,37(1):6-10.
- [18] Shen Z, Yao W, Xiao P, et al. Research progress of soil and water conservation in Pisha stone area of Yellow River [C] // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2020, 1637(1): 012085.
- [19] Meng X, Zhu Y, Yin M, et al. The impact of land use and rainfall patterns on the soil loss of the hillslope[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-10.
- [20] Wu L, Liu X, Ma X. Spatiotemporal distribution of rainfall erosivity in the Yanhe River watershed of hilly and gully region, Chinese Loess Plateau[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(4): 1-13.
- [21] Xin Z B, Yu X X, Li Q Y, et al. Spatiotemporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008 [J]. *Regional Environmental Change*, 2011,11(1):149-159.
- [22] 王玲莉,张富,胡彦婷,等.侵蚀性降雨分类及植被类型对产流产沙的影响[J].*人民黄河*,2021,43(10):1-5.
- [23] Wei W, Chen L, Fu B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. *Journal of hydrology*, 2007, 335(3-4): 247-258.
- [24] 吴光艳,成婧,祝振华,等.黄土高原南部人工林林冠对降雨特征的影响分析[J].*水土保持研究*,2011,18(4):32-35,42.
- [25] 孙佳美,余新晓,梁洪儒,等.模拟降雨条件下不同覆被减流减沙效益与侵蚀影响因子[J].*水土保持通报*,2015,35(2):46-51.
- [26] Zhang X P, Zhang L, McVicar T R, et al. Modelling the impact of afforestation on average annual streamflow in the Loess Plateau, China [J]. *Hydrological Processes: An International Journal*, 2008, 22(12): 1996-2004.
- [27] 肖培青,姚文艺,王昌高.灌木减流减沙效应及其水力学机理试验研究[J].*泥沙研究*,2012(5):33-37.
- [28] 肖培青,姚文艺,刘慧.砒砂岩地区水土流失研究进展与治理途径[J].*人民黄河*,2014,36(10):92-94.
- [29] Liang Z, Wu Z, Yao W, et al. Pisha sandstone: Causes, processes and erosion options for its control and prospects[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2019,7(1):1-8.
- [30] 张琪琳,王占礼,王栋栋,等.黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J].*地球科学进展*,2017,32(10):1093.
- [31] 何有华.紫花苜蓿在陇中地区生态环境建设中的作用分析[J].*草业科学*,2002,19(10):17-18.
- [32] 王恒星,张建军,孙若修,等.晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J].*北京林业大学学报*,2021,43(3):85-95.
- [33] 张霞,李鹏,李占斌,等.坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J].*农业工程学报*,2019,35(7):122-128.